第40卷 第1期
2023年1月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 1
Jan. 2023

干旱区绿洲膜下滴灌棉田蒸散发

刘延雪[1,2]， 乔长录[1,2]

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832000；
2. 现代节水灌溉兵团重点实验室，新疆 石河子 832000）

摘 要：蒸散发是干旱区农田水循环过程中水分消耗的主要途径，对研究气候变化下干旱区农田耗水规律和制定科学的灌溉制度有重要作用。连续3 a利用大型称重式蒸渗仪监测滴灌棉田蒸散发，设置覆膜与不覆膜对比试验，研究蒸散发过程，分析覆膜和气象因素对蒸散发的影响。结果表明：(1) 在棉花整个生育期内，覆膜与不覆膜滴灌棉田的平均蒸散量分别为292.15 mm和429.22 mm，膜下滴灌的种植方式可以降低31.93%的蒸散量。(2) 蒸散量和蒸散强度在不同生育阶段的大小关系：花铃期＞蕾期＞吐絮期＞苗期。(3) 滴灌棉田在00:00—08:00进行凝结，在08:00—23:00进行蒸散发，蒸散量在午后达到最大值，苗期最大值出现最早，花铃期最大值出现最晚。(4) 蒸散发与风速、辐射、气温呈正相关；与湿度和气压呈负相关。(5) 降雨会促进滴灌棉田蒸散发。总体而言，覆膜可以减少水分蒸散发，有助于提升农业生产过程中的水分利用效率。

关键词：蒸散发；滴灌棉田；蒸渗仪；干旱区

蒸散发(Evapotranspiration，ET)作为陆面水分和能量循环过程中的重要环节，对于深刻理解水文循环及陆面生态系统水文过程至关重要[1]。在干旱区，作物蒸散发是农田水循环过程中水分损失的主要途径[2]，约有90%以上的降水通过蒸散回到大气当中[3]，其与降水共同影响干旱程度。但干旱区农田的水资源有效利用程度并不高，因此明确具体的作物蒸散发过程和气象对其的影响对科学认识干旱区农田水循环过程、研究气候演变下有无地膜覆盖下滴灌种植的优缺点、合理调配水资源、制定科学的灌溉制度[4]等有重要意义。

农业结构中蒸散发的量变过程和影响因素一直都是国内外的研究热点，国外对此侧重于蒸散发在不同环境下的量变程度及其变化过程中的能量平衡情况[5]。Jamshidi等[6]对半干旱气候下伊朗南部滴灌柑桔在5个灌溉水平(100%、90%、75%、60%和45%的参考蒸散量)下的实际蒸散发进行监测，研究表明按60%蒸散发进行滴灌有利于柑橘的可持续生产。Keffer等[7]针对不同水分和遮光条件下的亚马逊黄檀，测定其苗期的蒸散量和作物系数，随着水分和遮光率的增加，蒸散量和作物系数均降低。Vanomark等[8]对采用波文比能量平衡法对北里奥格兰德州的甜瓜蒸散量进行测定，具体分析蒸散发过程中感热通量和土壤热通量的变化过程，研究发现60%以上的净辐射转化为潜热通量，21%净辐射转化为感热通量。Renner等[9]运用相位差对卢森堡地区蒸散发过程中的能量变化进行分析，研究表明蒸散发过程中存在能量不平衡，且湍流通量滞后于有效能量。在国内对农业结构中蒸散发的研究主要集中于干旱和半干旱地区，侧重于覆膜环境下蒸散量的定量分析和作物灌溉制度的优化[10]。Li等[11]对玉米田中7种不同种类薄膜覆盖下的土壤-植物水分动态进行测量，研究表明覆膜可以有效降低蒸散发，增加水分储备，促进玉米中后期的生长发育。Ai等[12]采用改良的双作物系数法估算了南疆干旱区枣树和棉花单作的蒸散量，根据间作作物比例，引入土壤水分胁迫系数估算枣棉间作蒸散量，估算作物间作水分利用效率，对于枣棉间作灌溉制度的优化具有重要意义。吴程[13]应用微型蒸发器结合水量平衡法确定膜下滴灌棉田的蒸散量

收稿日期：2022-07-12； **修订日期：**2022-09-06
基金项目：国家自然科学基金项目(51769030)；兵团科技计划重大项目(2021AA003)；兵团科技计划重点项目(2022DB024)
作者简介：刘延雪(1999-)，女，硕士研究生，主要从事干旱区蒸散发方面的研究. E-mail: liuyanxue@stu.shzu.edu.cn
通讯作者：乔长录. E-mail: qiaochanglu@126.com

及作物参数,明确棉花生育期内的蒸散量对合理制定灌溉制度,科学利用与管理水资源有重要意义。刘净贤等[14]利用涡度相关资料从能量角度分析新疆北部膜下滴灌棉田不同生育期的蒸散变化特征,研究结果表明净辐射对蒸散发影响最大。综上所述,国内外学者从水量变化、影响因素、作物系数等角度对农业结构中的蒸散发进行了广泛研究,但对较长时间尺度下的膜下滴灌棉田蒸散发研究较少,对其耗水规律认识不够充分。

本文以石河子大学节水灌溉试验站内3 a蒸散发实测数据为依据展开研究,旨在明晰滴灌棉田的蒸散发变化过程及气候变化对其的影响效果,确定滴灌棉田在整个棉花生育期内的蒸散耗水规律,为制定棉田灌溉制度和用水时空分配提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

试验于2019—2021年在新疆兵团现代节水灌溉重点实验站开展,实验站位于石河子市西郊二连石河子大学试验场(89°59′47″E,44°19′28″N,海拔412 m),该区域位于新疆维吾尔自治区玛纳斯河流域中游的绿洲灌区内,气候为中温带大陆性干旱气候,年平均日照时间为2856 h,多年平均降雨量为207 mm,蒸散量为1660 mm,日均相对湿度50%,风速1.5 $m\cdot s^{-1}$,生育期内日均总辐射19.8 $MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$,且昼夜温差大,气温季节性变化突出。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 3台规格为2 m×2 m×2 m,型号为QYZS-2010的大型称重式蒸渗仪对试验棉田的蒸散量进行实时监测,为减小环境因素对试验的影响,保证数据的可靠性,突出覆膜对蒸散量的影响效果,其中两台的灌溉方式为膜下滴灌,1台为不覆膜滴灌,除此之外其他试验条件均相同。膜下滴灌棉田按照一膜三管六行的机采棉种植方式种植棉花,地膜宽度为205 cm,滴灌毛管采用单翼滴灌带。试验期内,当大型称重式蒸渗仪内的水量发生变化时,土壤质量随之发生变化,蒸渗仪内的高分辨率位移传感器会以电流值的形式记录该变化,通过对电流变化值进行标定,由此计算蒸散量。蒸渗仪精度为0.02 mm,数据采集的时间间隔为1 h。

对于棉田灌溉,根据水量平衡原理,依据《灌溉试验规范》(SL 13-2004)[15]制定其灌溉制度:

$$ET = 10\gamma H(\theta_1 - \theta_2) + M + P + K - C \quad (1)$$

式中:ET为计算时段内的作物需水量(mm);γ为土壤干容重($g\cdot cm^{-3}$);H为土壤厚度(cm);θ_1和θ_2为计算时段初始与结束时的土壤含水率;M为时段内的灌水量(mm);P为时段内的降水量(mm);K为时段内的地下水补给量,由于棉花种植在蒸渗仪内,没有地下水补给,因此,K为0 mm;C为时段内的排水量,在试验过程中也没有排水,因此,C为0 mm。

灌水周期由《微灌工程技术规范》(GB/T 50485-2009)[16]确定:

$$T = \frac{\delta M}{ET_a} \quad (2)$$

式中:T为灌水周期(d);δ为灌水利用率,本试验中取0.9[16];M为时段内的灌水量(mm);ET_a为田间耗水率($mm\cdot d^{-1}$)。

1.2.2 数据处理 在试验过程中,恶劣天气、仪器故障、其他不可控因素等会影响数据的监测,因此需要对原始数据进行修正和优化。利用统计分析软件SPPS 26中的质量控制,消除异常数据,主要包括明显不符合正常数据变化范围的异常值、降雨时期的数据和灌水日数据。为保证数据序列的完整性,对于缺失数据,再根据数据缺失时长的不同进行插补。

(1) 数据缺失的连续时长小于3 h,采用简单的线性内插进行补充;

(2) 数据缺失的连续时长在3~24 h内,采用平均日变化方法(Mean Diurnal Variation,MDV)[17]进行插补;

(3) 数据缺失的连续时长在1~2 d,结合气象数据,运用FAO推荐的Penman-Montieth公式[18]进行计算插补:

$$ET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中:Δ为饱和水汽压斜率($kPa\cdot ℃^{-1}$);R_n为净辐射($MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$);$G$为土壤热通量($MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$);$\gamma$为干湿表常数($kPa\cdot K^{-1}$);$T$为温度(℃);$U_2$为风速($m\cdot s^{-1}$);$e_s$为饱和水汽压(kPa);$e_d$为实际水汽压(kPa)。

(4) 数据缺失的连续时长大于2 d,不对数据进行插补,即视为无效数据,剔除当日记录。

经过上述处理,得到全生育期内每日逐小时蒸散发数据,在此基础上进行数据平滑和数据规整[19],

将处理过的蒸渗仪实测蒸散量数据与涡度仪实测蒸散量数据进行一致性检验，其结果见表1。对于通过一致性检验的数据，利用Microsoft Excel 2019计算整个生育期内不同时间尺度上的蒸散量。由于蒸散发主要发生在08:00—23:00，因此对一日内08:00—23:00的逐小时蒸散量进行求和得到日蒸散量，对日蒸散量求和可以得到各个不同生育阶段的蒸散量和全生育期蒸散量，使用Origin 2017制作蒸散量随时间变化图。

运用SPSS 26中的双变量相关性分析有无地膜覆盖情况下蒸散量和气象因素之间的相关性，其显著性P值小于0.05即为显著相关，存在线性相关关系，在此基础上再利用SPSS 26中的线性回归分析对蒸散量和气象因素进行拟合，R^2越接近1则拟合效果越好，因子间的线性关系越强。

2 结果与分析

2.1 有无地膜覆盖下棉田蒸散量变化

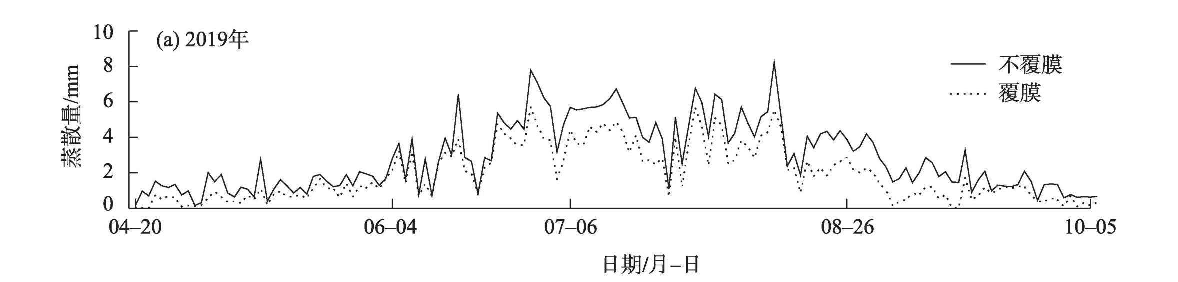
棉田在有无地膜覆盖的滴灌种植方式下，全生育期内的蒸散量变化趋势见图1。因3 a播种时间、气候变化和棉花生长发育过程均相似，故将棉花的生育期按照相同时间段进行划分，每年4月20日—6月3日为苗期；6月4日—7月5日为蕾期；7月6日—

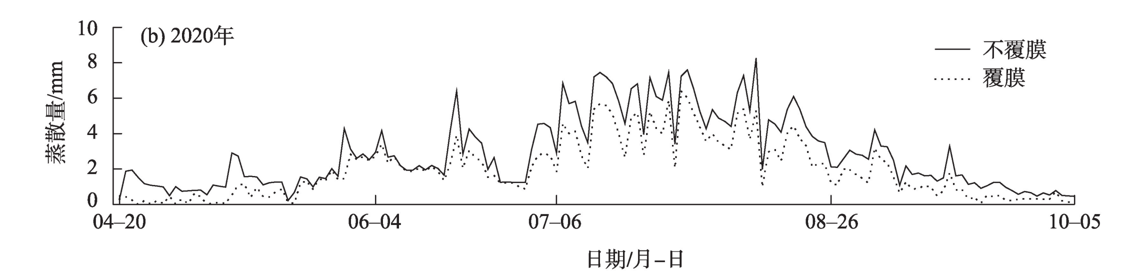
表1 蒸散量数据一致性检验结果

Tab. 1 Results of consistency test of evapotranspiration data

年份	2019年	2020年	2021年
有效数据数量	3504(146 d)	3696(154 d)	3456(144 d)
Cohen's Kappa系数	0.87	0.92	0.89

注：Cohen's Kappa系数大于0.80则表明一致性强。





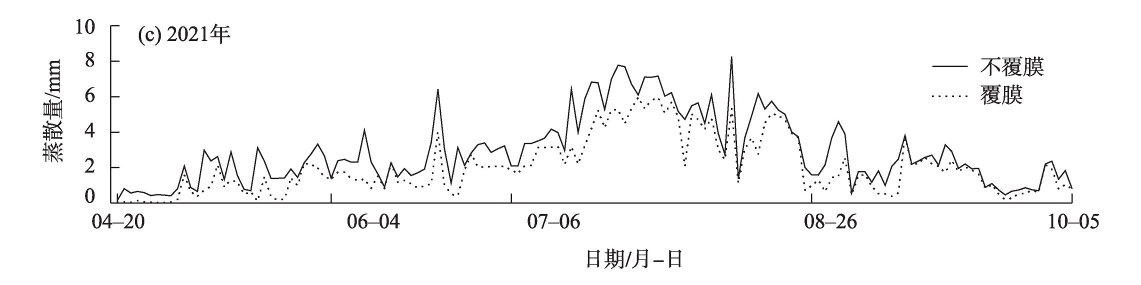


图1 有无地膜覆盖的滴灌棉田全生育期蒸散量

Fig. 1 Evapotranspiration in cotton field in the whole stage with or without film mulching

8月25日为花铃期;8月26日—10月5日为吐絮期。由于数据存在缺失和插补不足的情况,2019年、2020年和2021年实际有效统计时长分别为146 d、154 d、144 d。

综合3 a变化趋势来看,膜下滴灌的种植方式可以明显减少蒸散量,且无论有无地膜覆盖,滴灌棉田在棉花整个生育期内蒸散量的变化趋势基本一致,因而膜下滴灌并不会影响棉花的正常生长发育。

从有无地膜覆盖下的滴灌棉田蒸散量可以看出(表2),膜下滴灌棉田在棉花整个生育期内的蒸散量平均为292.15 mm,蒸散强度平均为1.79 mm·d^{-1},不覆膜滴灌棉田在棉花整个生育期内的蒸散量平均为429.22 mm,蒸散强度平均为2.62 mm·d^{-1}。相较于不覆膜滴灌,在膜下滴灌的种植方式下,蒸散量和蒸散强度均可以降低31.93%。

在棉花的生育周期内,会经历苗期、蕾期、花铃期和吐絮期4个阶段。3 a试验期内,在膜下滴灌种植方式下,苗期平均蒸散量为27.79 mm;蕾期平均蒸散量为60.29 mm;花铃期平均蒸散量为162.63 mm;吐絮期平均蒸散量为41.44 mm;在不覆膜滴灌种植方式下,苗期平均蒸散量为52.36 mm;蕾期平均蒸散量为84.17 mm;花铃期平均蒸散量为222.55 mm;吐絮期平均蒸散量为70.14 mm。因此,相较于不覆膜滴灌,膜下滴灌的种植方式在苗期平均可以降低46.91%蒸散量;在蕾期平均可以降低28.37%蒸散量;在花铃期平均可以降低26.93%蒸散量;在吐絮期平均可以降低40.92%蒸散量。且蒸散强度差异与蒸散量差异相同。由此可见,膜下滴灌棉田的蒸散量和蒸散强度均低于不覆膜滴灌棉田,覆膜对蒸散发的抑制作用尤其体现在苗期和吐絮期,在蕾期和花铃期,覆膜对蒸散发的抑制作用稍弱。

在各个生育阶段,无论是膜下滴灌还是不覆膜滴灌,对于棉花的蒸散量和蒸散强度而言:花铃期>蕾期>吐絮期>苗期,滴灌棉田在花铃期的蒸散量超过棉花全生育期内蒸散量的一半,花铃期的蒸散强度也大于全年平均蒸散强度的一半,即花铃期的滴灌棉田蒸散发作用最强烈。

2.2 有无地膜覆盖下棉田蒸散过程动态变化

在2019年、2020年、2021年中针对4个不同生育阶段,剔除降雨日、灌水日和数据异常日,根据棉花生长状态,在每个生育阶段中选择某一天作为典型日进行分析(表3),典型日需要满足以下要求:(1)棉花生长状态稳定,在所处生育阶段中具有典型性;(2)灌水和降雨后的3 d内土壤水分变化较大,不适宜作典型日;(3)3 a内各个生育阶段的典型日尽可能相近。

通过分析可以看出(图2~图5),在00:00—08:00蒸散量在有无地膜覆盖的情况下均为负值,即在这一阶段不仅没有水分损失,反而在吸收水分,这一时段内的过程即为凝结过程[20-23]。通过对比膜下滴

表2 有无地膜覆盖下的滴灌棉田蒸散量

Tab. 2 Evapotranspiration in cotton field with or without film mulching

生育期			苗期	蕾期	花铃期	吐絮期	合计
2019年	蒸散量/mm	覆膜	27.45	77.53	141.74	34.68	281.40
		不覆膜	48.65	102.98	200.45	69.92	422.00
	蒸散强度/(mm·d^{-1})	覆膜	0.70	2.87	3.37	0.91	1.93
		不覆膜	1.25	3.81	4.77	1.84	2.89
	蒸散量(强度)降低率/%		43.58	24.71	29.29	50.40	33.32
2020年	蒸散量/mm	覆膜	31.83	61.95	172.71	36.42	302.91
		不覆膜	60.27	81.00	240.33	65.07	446.66
	蒸散强度/(mm·d^{-1})	覆膜	0.78	2.14	3.93	0.91	1.97
		不覆膜	1.47	2.79	5.46	1.63	2.90
	蒸散量(强度)降低率/%		47.18	23.52	28.14	44.03	32.18
2021年	蒸散量/mm	覆膜	24.10	41.39	173.43	53.21	292.14
		不覆膜	48.15	68.53	226.88	75.44	419.00
	蒸散强度/(mm·d^{-1})	覆膜	0.75	1.53	3.85	1.33	2.03
		不覆膜	1.50	2.54	5.04	1.89	2.91
	蒸散量(强度)降低率/%		49.95	39.60	23.56	29.46	30.28

表3 典型日选择

Tab. 3 Typical days selected

生育阶段	2019年	2020年	2021年
苗期	5月12日	5月12日	5月13日
蕾期	6月17日	6月19日	6月24日
花铃期	8月13日	8月13日	8月13日
吐絮期	9月15日	9月15日	9月15日

灌棉田与不覆膜滴灌棉田的蒸散量变化过程可以发现，膜下滴灌的种植方式会抑制凝结水进入土壤，减弱凝结作用，不覆膜滴灌更加利于凝结水进入土壤，补充土壤水分[24]。

在08:00—23:00，蒸散量在有无地膜覆盖的情况下均为正值，即在这一时段内无论是膜下滴灌还是不覆膜滴灌，棉田都在进行蒸散发。在苗期，膜下滴灌棉田与不覆膜滴灌棉田的蒸散量在13:00同步达到最大值，并且最大蒸散量将持续4 h；在蕾期，膜下滴灌棉田的蒸散量在12:00—15:00达到最大值，蒸散量的变化呈现双峰状态，不覆膜滴灌棉田的蒸散量在15:00达到最大值，其变化过程呈现单峰状态；在花铃期，膜下滴灌棉田的蒸散量在14:00—17:00同步达到最大值，蒸散量的变化呈现双峰状态，不覆膜滴灌棉田的的蒸散量在16:00达到最大值，其变化过程呈现单峰状态；在吐絮期，不覆膜滴灌棉田的蒸散量在14:00达到最大值，相较于不覆膜滴灌，膜下滴灌棉田的蒸散量最大值的出现会滞后1~2 h。

无论在哪种滴灌环境下，蒸散量出现最大值的时间均存在以下规律：苗期最早出现最大值，其次是吐絮期和蕾期，花铃期最晚出现最大值（图6）。典型日的蒸散量与全生育期的蒸散量大小规律一

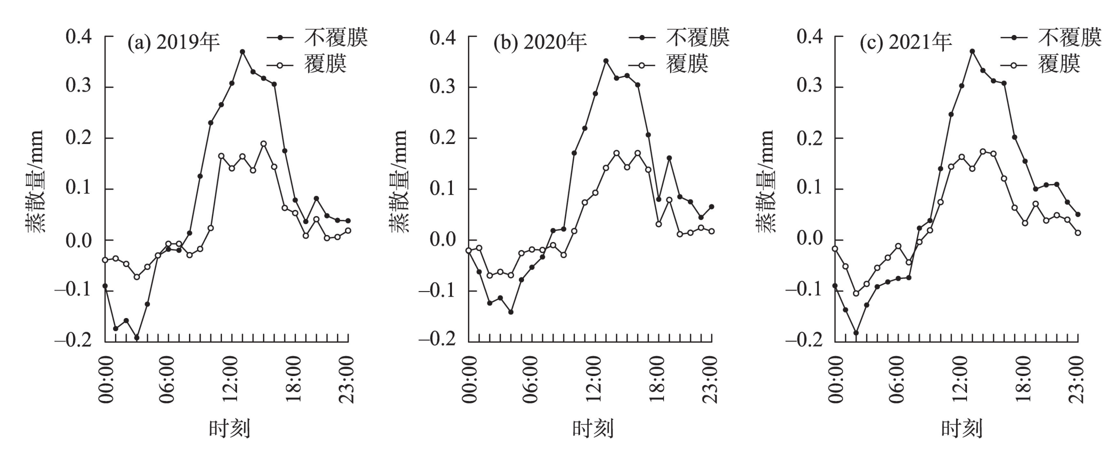


图2 有无地膜覆盖下滴灌棉田苗期典型日的蒸散量

Fig. 2 Evapotranspiration in cotton field in seeding stage with or without film mulching

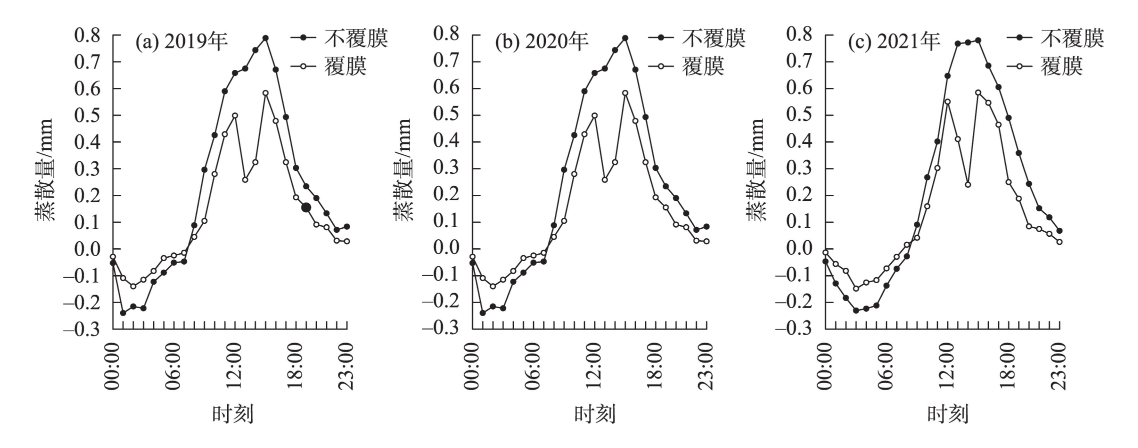


图3 有无地膜覆盖下滴灌棉田蕾期典型日的蒸散量

Fig. 3 Evapotranspiration in cotton field in budding stage with or without film mulching

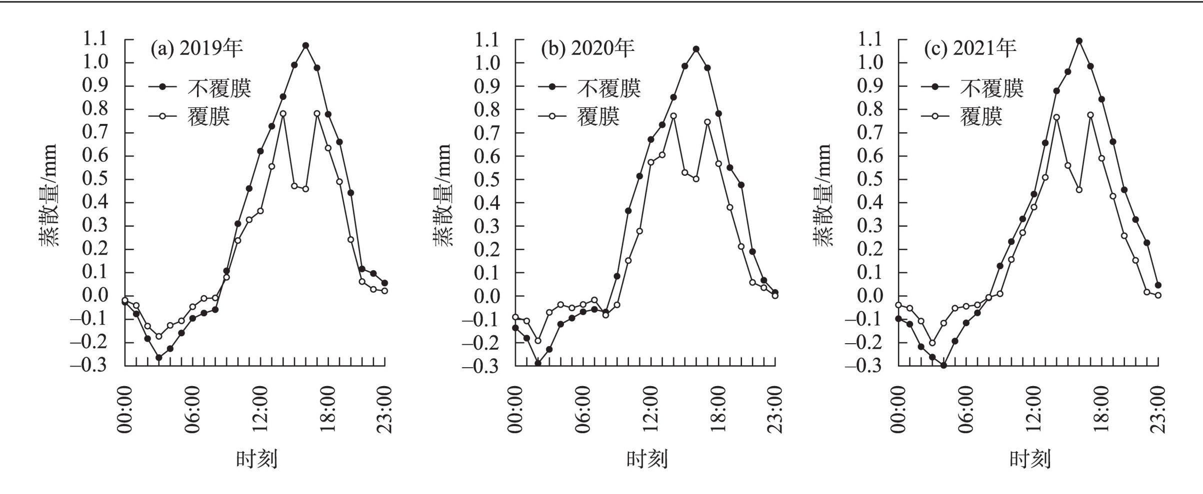


图4　有无地膜覆盖下滴灌棉田花铃期典型日的蒸散量

Fig. 4　Evapotranspiration in cotton field in blooming and boll stage with or without film mulching

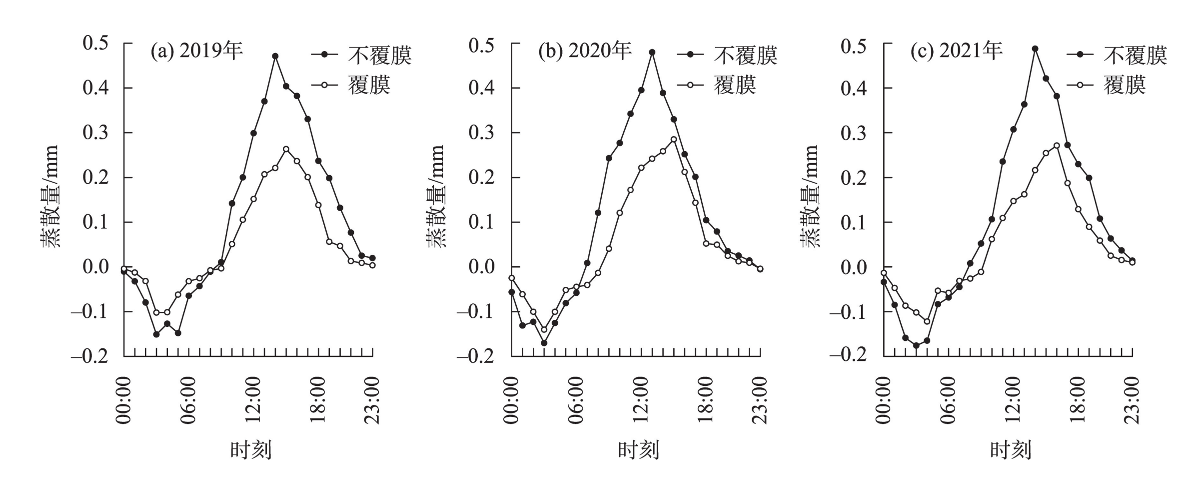


图5　有无地膜覆盖下滴灌棉田吐絮期典型日的蒸散量

Fig. 5　Evapotranspiration in cotton field in boll opening stage with or without film mulching

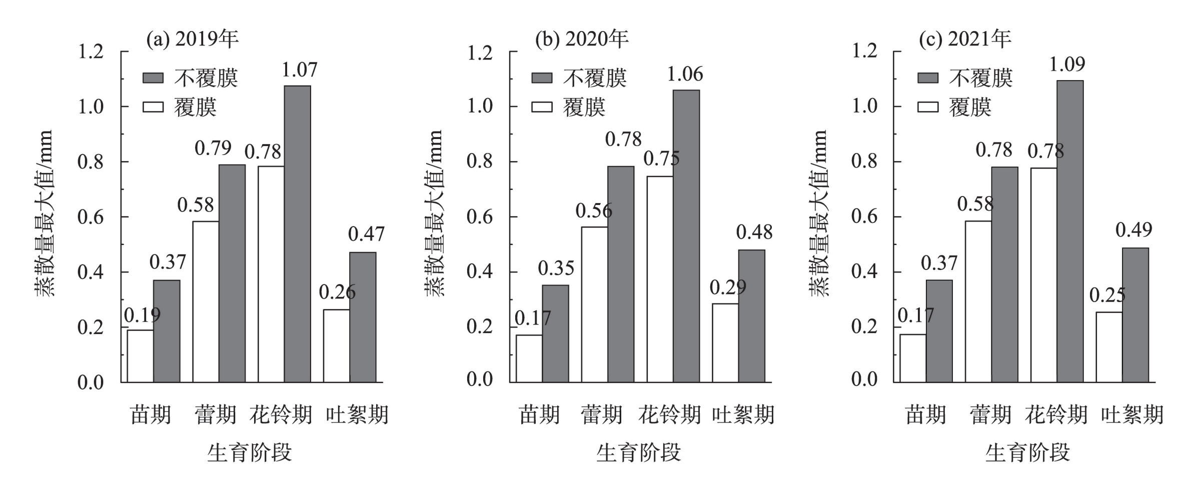


图6　各个生育阶段典型日的蒸散量最大值

Fig. 6　Maximum evapotranspiration of typical day for each growth stage

致：花铃期>蕾期>吐絮期>苗期。

2.3 不同尺度下气象因素相关性分析

2.3.1 年尺度相关性分析 在年尺度上，蒸散量与影响因素相关性分析结果及相关回归公式见表4。通过分析可以发现，蒸散量与风速、辐射、气温呈正相关；与湿度和气压呈负相关。其中，受气压的影响最为强烈，其次是气温、湿度、风速，相比之下，蒸散量受辐射的影响最弱。并且，不覆膜滴灌棉田的蒸散量与影响因素之间的相关系数大于膜下滴灌棉田的蒸散量，说明不覆膜滴灌棉田的蒸散量更容易受到气象变化的影响。但就相关系数的绝对大小而言，在年尺度上均较小。

2.3.2 日尺度相关性分析 为了充分研究有无地膜覆盖下蒸散量与气象要素之间的相关关系，在日尺度上，对各个生育阶段内典型日的蒸散量与气象要素进行相关性分析，其分析结果见表5。

通过分析，在日尺度上，蒸散量与风速、辐射、气温呈正相关；与湿度和气压呈负相关。不覆膜滴灌棉田的蒸散量与影响因素之间的相关系数基本上大于覆膜滴灌棉田的蒸散量，说明不覆膜滴灌棉田的蒸散量更容易受到气象变化的影响。这两项分析结果与年尺度上的分析结果一致。

在苗期，风速对膜下滴灌棉田的蒸散量影响最大，辐射对不覆膜滴灌棉田的蒸散量影响最大；在蕾期，辐射对滴灌棉田的蒸散量影响最大；在花铃期和吐絮期，气温对滴灌棉田的蒸散量影响最大，这一分析结果与年尺度上的分析结果并不一致。

2.4 不同天气条件下棉田蒸散量

无论有无地膜覆盖，滴灌棉田在花铃期的蒸散量和蒸散强度均最大，且新疆辐射最强、气温最高的时间段和雨季均为6—8月，因此为了研究晴天和雨天条件下有无地膜覆盖对棉田蒸散量的影响效果，均选择花铃期作为研究时段。

2.4.1 棉田在晴天的蒸散量 在晴天条件下，选择花铃期中辐射最强、温度最高、蒸散量最大的一天作为典型晴天日，3 a的典型晴天日相似，蒸散量计算结果见表6。膜下滴灌棉田的日平均蒸散量为5.2 mm·d^{-1}，不覆膜滴灌棉田的日平均蒸散量为8.16 mm·d^{-1}，覆膜可以降低35.97%的水分蒸散发损失。与整个花铃期日平均蒸散量相比，覆膜在晴天条件下的抑制水分蒸散发的作用较为突出。

2.4.2 棉田在雨天的蒸散量 在雨天条件下，选择花铃期中降雨量与湿度较大的一天作为典型雨天日，3 a的典型雨天日相似，对雨天的前一日和后一日的蒸散量进行计算，结果见表7。比较降雨前后有无地膜覆盖条件下的日平均蒸散量可以发现，覆

表4 蒸散量与影响因素在年尺度上的相关性

Tab. 4 Correlation analysis between evapotranspiration and influencing factors on the annual scale

分析条件		风速	辐射	气温	湿度	气压	备注
相关系数	覆膜	0.32	0.21	0.49	−0.48	−0.57	$P<0.05$
	不覆膜	0.34	0.21	0.47	−0.47	−0.57	
线性回归	覆膜	蒸散量=49.59+风速×0.46+辐射×0.01+气温×0.16−湿度×0.07−气压×0.59					R^2=0.61
	不覆膜	蒸散量=88.95+风速×0.66+辐射×0.01+气温×0.15−湿度×0.09−气压×0.99					R^2=0.60

表5 蒸散量与影响因素在日尺度上的相关性

Tab. 5 Correlation analysis between evapotranspiration and influencing factors on the daily scale

分析条件		风速	风向	辐射	气温	湿度	气压	备注
苗期	覆膜	0.833	0.823	0.828	0.839	−0.590	−0.572	$P<0.05$
	不覆膜	0.815	0.780	0.884	0.787	−0.434	−0.731	
蕾期	覆膜	0.744	0.771	0.854	0.782	−0.476	−0.584	
	不覆膜	0.756	0.795	0.839	0.817	−0.429	−0.602	
花铃期	覆膜	0.780	0.876	0.833	0.895	−0.673	−0.406	
	不覆膜	0.846	0.920	0.842	0.934	−0.663	−0.432	
吐絮期	覆膜	0.758	0.861	0.795	0.896	−0.639	−0.304	
	不覆膜	0.845	0.867	0.843	0.887	−0.605	−0.480	

表6 棉田在晴天的日蒸散量

Tab. 6 Daily evapotranspiration of cotton field on sunny day

分析条件	2019年	2020年	2021年	典型晴天日平均值	花铃期日平均值
覆膜/(mm·d^{-1})	5.37	5.11	5.20	5.23	3.72
不覆膜/(mm·d^{-1})	8.25	8.07	8.16	8.16	5.09
蒸散量降低率/%	34.93	36.71	36.30	35.97	26.98

表7 棉田在雨天前后的日蒸散量

Tab. 7 Daily evapotranspiration of cotton field before and after a rainy day

分析条件		2019年	2020年	2021年	典型雨天日平均值
降雨前/(mm·d^{-1})	覆膜	3.21	3.30	3.16	3.22
	不覆膜	4.22	4.24	4.13	4.20
蒸散量降低率/%		23.93	22.17	23.49	23.19
降雨后/(mm·d^{-1})	覆膜	5.17	5.25	5.18	5.20
	不覆膜	7.09	7.22	7.11	7.14
蒸散量降低率/%		27.08	27.29	27.14	27.17

膜降雨前蒸散量＜不覆膜降雨前蒸散量＜覆膜降雨后蒸散量＜不覆膜降雨后蒸散量,说明降雨可以促进蒸散发,且覆膜在降雨后对水分蒸散发的抑制作用强于降雨前。

3 讨 论

3.1 蒸散发变化原因

滴灌棉田在棉花整个生育期内主要以棉花蒸腾和土壤蒸发为主要途径进行水分的蒸散发,无论是膜下滴灌还是不覆膜滴灌,随着时间的推移,各个气象要素和棉花生产发育情况不断变化,多个因素[25-27]同时影响滴灌棉田的蒸散发,以气温和辐射为主。

在苗期,棉花植株矮小,叶片数量少,叶片面积小,且这一阶段气温低,辐射低,湿度大,不利于棉花蒸腾和土壤蒸发,因此滴灌棉田的蒸散发作用较弱;当棉花进入蕾期之后,植株开始快速生长,叶片数量与叶片面积不断增加,对土壤的覆盖程度也增加,气温升高,辐射增强,湿度减小,促进了棉花蒸腾和土壤蒸发,因此滴灌棉田的蒸散发作用增强;当棉花进入花铃期后,棉花植株基本定型,叶片生长完全,其叶片数量和叶片面积达到整个生育期内的最大值,温度和辐射也达到一年中的最大值,但温度和辐射过高会抑制棉花叶片上气孔的开合程度,因此棉花蒸腾作用在温度最高时出现下降,但相较于其他阶段,这一阶段的棉花蒸腾作用仍然最强;虽然棉花叶片会在一定程度上遮挡土壤,但由于高温和高辐射,土壤蒸发会保持高强度状态,土壤蒸发和棉花蒸腾都会在这一阶段达到整个生育期内的最大值,这一阶段为整个生育期内蒸散发作用最强的时期;在棉花进入吐絮期后,棉花植株开始衰老,叶片逐渐枯萎凋落,叶片数量和叶片面积持续降低,因而这一阶段的棉花蒸腾减弱。且在这一阶段气温和辐射降低,湿度增加,土壤蒸发也会减弱。本文研究结果与其他学者在这一方面的研究结果基本一致[28-29]。

3.2 有无地膜覆盖下蒸散发动态变化差异

在棉花不同生育阶段内,不覆膜滴灌棉田的蒸散发动态变化过程为单峰形式,而膜下滴灌棉田在蕾期和花铃期的蒸散发动态变化过程为双峰形式,这与李战超[30]的研究结果一致。其主要原因是覆膜改变了原有的土壤条件,抑制了土壤蒸发。一天内的最高温度出现在午后,在高温环境下,棉花叶片上的气孔关闭导致棉花蒸腾作用减弱,又因为覆膜会抑制土壤蒸发,所以膜下滴灌棉田的蒸散量会突然降低,当气温逐渐降低时,蒸散量逐渐增加。而不覆膜滴灌棉田的土壤蒸发会随着高温保持高强度状态,因此膜下滴灌棉田的蒸散量明显低于不覆膜滴灌棉田的蒸散量。但蒸渗仪的测定精度在这一阶段受到土壤性质、作物种类及其种植密度的影响较大[31],会存在一定误差。

3.3 不同时间尺度下相关性差异

各个气象因素对蒸散量的影响效果在年尺度相关性分析和日尺度相关性分析上存在不同。其原因是在年尺度相关性分析中,为了综合整个生育期的情况,采用气象要素日均值与日蒸散量进行分析,由于新疆地区昼夜温差大,气温和辐射在日尺度上变化剧烈,取日均值会大大削弱其变化趋势,减弱了气象要素变化对蒸散量的影响效果,因而导致年尺度相关性分析的典型性弱于日尺度相关性分析,后者更有利于说明气象要素对滴灌棉田蒸散发的影响。

3.4 不同天气条件下蒸散量差异

在花铃期的晴天条件下,温度和辐射高,会促进蒸散发,尤其对土壤蒸发的影响较大,而覆膜遮挡土壤的蒸发面,较大限度的抑制土壤蒸发,所以覆膜在晴天条件下对棉田蒸散发的抑制作用尤其突出。

在雨天条件下,降雨前棉田中的湿度低,温度高,蒸发大,棉花对水的需求大,可供蒸散发的水分较少,降雨会提高湿度,降低田间温度,减小蒸发,耗水量降低,从而需水量减小,多余的水分蒸散发,因此降雨会促进蒸散发,无论有无地膜覆盖,降雨前的蒸散量均低于降雨后的蒸散量;而覆膜抑制了土壤水分的蒸散发,使得水分更多被保留在土壤中,提高了土壤含水率,供给棉花使用,所以覆膜对降雨后滴灌棉田蒸散发的抑制作用强于降雨前。在潘杉杉等[32]的研究中,着重考虑了土壤含水率对蒸散发的研究,而本研究中对于降雨后的蒸散发,也归因于降雨能够提高土壤含水率。

4 结 论

本文通过计算2019—2021年干旱区滴灌棉田在有无地膜覆盖情况下的蒸散量,并分析其与气象之间的相关关系,研究结果如下:

(1) 不覆膜滴灌棉田在棉花整个生育期内的蒸散量平均为429.22 mm,通过采用膜下滴灌的种植方式可以降低31.93%的蒸散量,使得膜下滴灌棉田在棉花整个生育期内的蒸散量降低至292.15 mm。

(2) 无论有无地膜覆盖,蒸散量和蒸散强度的最大值均出现在花铃期,蕾期和吐絮期次之,最小值均出现在苗期。

(3) 无论有无地膜覆盖,滴灌棉田在00:00—08:00进行凝结,在08:00—23:00进行蒸散发,蒸散量在午后达到最大,其出现的时间由早到晚顺序为:苗期、吐絮期、蕾期、花铃期。

(4) 蒸散量与风速、辐射、气温呈正相关;与湿度和气压呈负相关。在年尺度上,气温对蒸散量的影响最大,而在日尺度上,辐射对蒸散量的影响最大,且日尺度上的相关性较于年尺度更显著。

(5) 降雨会促进滴灌棉田蒸散发,且覆膜对降雨后蒸散发的抑制作用强于降雨前。

参考文献(References):

[1] Stocker T F, Raible C C. Climate change: Water cycle shifts gear[J]. Nature, 2005, 434: 830–833.

[2] 刘晓英, 李玉中, 钟秀丽, 等. 基于称重式蒸渗仪实测日值评价16种参考作物蒸散量(ET_0)模型[J]. 中国农业气象, 2017, 38(5): 278–291. [Liu Xiaoying, Li Yuzhong, Zhong Xiuli, et al. Evaluation of 16 models for reference crop evapotranspiration (ET_0) based on daily values of weighing lysimeter measurements[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(5): 278–291.]

[3] 赵文智, 吉喜斌, 刘鹄. 蒸散发观测研究进展及绿洲蒸散研究展望[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 463–470. [Zhao Wenzhi, Ji Xibin, Liu Hu. Progresses in evapotranspiration research and prospect in desert Oasis evapotranspiration research[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 463–470.]

[4] Mccabe M F, Wood E F. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105: 271–285.

[5] Dhungel Ramesh, Aiken Robert, Evett Steven R. et al. Energy imbalance and evapotranspiration hysteresis under an advective environment: Evidence from lysimeter, eddy covariance, and energy balance modeling[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(1): e2020GL091203.

[6] Jamshidi S, Zand-Parsa S, Kamgar-Haghighi A A, et al. Evapotranspiration, crop coefficients, and physiological responses of citrus trees in semi-arid climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2020, 227: 105838.

[7] Keffer J F, da Silva C C, de Souza A P, et al. Evapotranspiration and water sensitivity of Amazonian yellow ipe seedlings under different shading conditions[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícolae Ambiental, 2019, 23(10): 733–740.

[8] Vanomark G M M S, Sobrinho José, Bezerra José, et al. Energy balance partitioning and evapotranspiration from irrigated Muskmelon under Semi-Arid Conditions[J]. Bragantia, 2018, 77(1): 168–180.

[9] Renner Maik, Brenner Claire, Kaniska Mallick, et al. Using phase

lags to evaluate model biases in simulating the diurnal cycle of evapotranspiration: A case study in Luxembourg[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(1): 515–535.

[10] 易珍言. 农田区域蒸散发和土壤含水量协同获取方法研究与应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. [Yi Zhenyan. Research and Application of Collaborating Acquisition of Evapotranspiration and Surface Soil Moisture over Irrigated Area[D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research, 2019.]

[11] Li Siyi, Li Yi, Lin Haixia, et al. Effects of different mulching technologies on evapotran spiration and summer maize growth[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 309–318.

[12] Ai Pengrui, Ma Yingjie. Estimation of evapotranspiration of a Jujube/Cotton intercropping system in an Arid Area based on the dual crop coefficient method[J]. Agriculture, 2020, 10(3): 10030065.

[13] 吴程. 干旱区绿洲膜下滴灌棉田蒸散量与作物系数研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2016. [Wu Cheng. Study on Evapotranspiration and Crop Coefficient of Cotton with Drip Irrigation under Mulch in Arid Oasis[D]. Alaer: Tarim University, 2016.]

[14] 刘净贤, 周石硚, 晋绿生, 等. 新疆北部膜下滴灌棉田的蒸散特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(2): 360–368. [Liu Jingxian, Zhou Shiqiao, Jin Lusheng, et al. Evapotranspiration of a film-mulched cotton field under drip irrigation in North Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(2): 360–368.]

[15] 中华人民共和国水利部. 灌溉试验规范(SL 13–2004)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. [Ministry of Water Resources of the People' s Republic of China. Irrigation Experiment Standard(SL 13–2004) [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2004.]

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 微灌工程技术规范(GB/T 50485–2009)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009. [Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People' s Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code for Microirrigation Engineering(GB/T 50485–2009)[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.]

[17] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for long term energy flux data sets[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 71–77.

[18] Smith M. Report on the Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirement[R]. FAO Rome , 1991.

[19] 季辰, 朱忠礼, 徐自为. 高精度称量式蒸渗仪数据处理方法研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(5): 628–634. [Ji Chen, Zhu Zhongli, Xu Ziwei. Data processing of high precision weighing lysimeter[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(5): 628–634.]

[20] 郭斌, 李卫红, 郝兴明, 等. 极端干旱区不同下垫面土壤凝结水试验研究[J]. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1171–1179. [Guo Bin, Li Weihong, Hao Xingming, et al. Measurements of soil condensation water on different types of underlying surfaces in extreme Arid Region[J]. Processing in Geography, 2012, 31(9): 1171–1179.]

[21] 李洪波. 半干旱区凝结水形成机制及对植物水分特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010. [Li Hongbo. Formation Mechanism of Condensation Water and It' s Effects on the Moisture Characteristics of Plant in Semi-arid Area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.]

[22] Scherm H, Van Bruggen A H C. Sensitivity of simulated dew duration to meteorological variations in different climatic regions of California[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1993, 66(3–4): 229–245.

[23] 庄艳丽, 赵文智. 干旱区凝结水研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(1): 31– 38. [Zhuang Yanli, Zhao Wenzhi. Advances in the condensation water of Arid Regions[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(1): 31–38.]

[24] 郭晓楠, 查天山, 贾昕, 等. 典型沙生灌木生态系统凝结水量估算[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(10): 80–87. [Guo Xiaonan, Zha Tianshan, Jia Xin, et al. Estimation of dewfall amount in a typical desert shrub ecosystem[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(10): 80–87.]

[25] 谢今范, 韦小丽, 张晨琛, 等. 第二松花江流域实际蒸散发的时空变化特征和影响因素[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3336–3343. [Xie Jinfan, Wei Xiaoli, Zhang Chenchen, et al. Spatiotemporal variation characteristics and related affecting factors of actual evapotranspiration in the second tributary of the Songhua and River basin, Northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(12): 3336–3343.]

[26] Zhang Zhaolu, Kang Hui, Yao Yunjun, et al. Spatialand decadal variations in satellite- based terrestrial evapotranspiration and drought over Inner Mongolia Autonomous Region of China during 1982–009[J]. Journal of Earth System Science, 2017, 126(8): 119.

[27] Ai Zhipin, Yang Yonghui, Wang Qinxue, et al. Characteristics and influencing factors of crop coefficient for drip-irrigated cotton under plastic- mulched condition in arid environment[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2018, 74(1): 1–8.

[28] 刘云飞, 孙怀卫, 桂东伟. 基于PT-Fi模型的新疆地区实际蒸散发计算及其气候环境因子的响应[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 193– 198. [Liu Yunfei, Sun Huaiwei, Gui Dongwei. Actual evapotranspiration estimation of Xinjiang based on PT- Fi model and its responses of climatic and environmental factors[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(4): 193–198.]

[29] 王小军, 黄健. 膜下滴灌模式下种植密度对棉田蒸散发规律影响研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(1): 138–143. [Wang Xiaojun, Huang Jian. Effect of planting density on evapotranspiration of cotton field with drip irrigation under mulch[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(1): 138–143.]

[30] 李战超. 干旱区膜下滴灌棉田蒸散量研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2013. [Li Zhanchao. Study of Evapotranspiration under

Cotton in Plastic Film Using Drip Irrigation in the Arid Areas[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2013.]

[31] Rana G, Katerji N. Measurement and estimation of actual evaporation in the field under Mediterranean climate: A review[J]. European Journal of Agonomy, 2000, 13(2): 125–153.

[32] 潘杉杉, 梁杏, 刘延锋, 等. 覆膜棉田蒸散发日变化规律及其影响因子分析[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(5): 1–8. [Pan Shanshan, Liang Xing, Liu Yanfeng, et al. Daily variation of evapotranspiration rate and its influencing factors in a cotton field under mulch [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(5): 1–8.]

Study on evapotranspiration of cotton field under drip irrigation in oasis of arid region

LIU Yanxue[1,2], QIAO Changlu[1,2]

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China;
2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: Crop evapotranspiration is the main way of water consumption in the process of farmland water cycle in arid region. It plays an important role in the study of the law of water consumption and formulating scientific irrigation systems under climate change in arid regions. A large-scale weighing lysimeter was used to monitor evapotranspiration of drip irrigation cotton field for 3 consecutive years. Drip irrigation under mulch film and no mulch film were compared to analyze the influence of film mulching and meteorological factors on evapotranspiration. Results showed that (1) in the whole growth period of cotton, the average evapotranspiration of drip irrigation cotton field under mulch film and under no mulch film were 292.15 and 429.22 mm, respectively. The method of drip irrigation under mulch film can reduce evapotranspiration by 31.95%. (2) The relationship between evapotranspiration and evapotranspiration intensity in different growth stages was as follows: blooming and boll stage > budding stage > boll opening stage > seedling stage. (3) The drip irrigation cotton field condenses from 00:00 to 08:00 and evaporated and transpired from 08:00 to 23:00. The evapotranspiration reached the maximum in the afternoon. The maximum appeared at the earliest stage in seedling stage, and at the latest in blooming and boll stage. (4) Evapotranspiration is positively correlated with wind speed, radiation, and temperature and negatively correlated with humidity and air pressure. (5) Rainfall can promote evapotranspiration in cotton fields under drip irrigation. Overall, drip irrigation under mulch film can effectively reduce the evaporation and improve the water use efficiency in the process of agricultural production.

Keywords: evapotranspiration; cotton field under drip irrigation; lysimeter; arid region